

УДК 697

ИЗМЕРЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ПРИМЕСИ В КАНАЛАХ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ СИСТЕМ

Соколов В.И.

MEASUREMENT OF ADMIXTURE CONCENTRATION IN CHANNELS OF VENTILATION SYSTEMS.

Sokolov V.I.

Рассматривается вопрос измерения концентрации примеси в газозвудушных потоках. Для определения местоположения датчика, соответствующего средней концентрации примеси, решается задача о диффузии в потоке плоского кругового источника. На основе анализа аналитического решения показано, что равномерная концентрация устанавливается на расстоянии 30 и более диаметров канала от места выброса примеси. В случае, когда нельзя реализовать данные требования, рекомендуется размещать датчик концентрации на расстоянии 0,62 радиуса трубы от ее оси.

Ключевые слова: промышленные выбросы, примесь, концентрация, диффузия.

Постановка проблемы

Ведение многих технологических процессов в химической, нефтеперерабатывающей, горнодобывающей промышленности, энергетике и других отраслях народного хозяйства сопровождается выбросами в атмосферу вредных для здоровья человека и окружающей природной среды отходов производственной деятельности, которые осуществляются вентиляционными системами. Кроме того, промышленные выбросы обусловлены необходимостью поддержания требуемых санитарно-гигиенических норм в производственных помещениях. Поэтому от точности контроля состава и объема выбросов во многом зависит как здоровье человека, так и экологическая ситуация. Достоверный контроль параметров промышленных выбросов позволяет рационально решать вопросы плановых мероприятий по модернизации вентиляционных систем и коррекции технологических процессов, предотвращать аварийные ситуации, разрабатывать программы по повышению экологической безопасности.

Анализ последних исследований и публикаций

В большинстве случаев выброс вредных компонентов осуществляется централизованной

подачей в выходную вентиляционную трубу, где организуется пробоотбор газозвудушной среды для измерения концентрации примеси. Поскольку равномерная концентрация примеси по сечению трубы устанавливается на определенном расстоянии от места выброса [1, 2], важно знать место установки датчика концентрации, которое достоверно определяет среднюю концентрацию примеси в газозвудушном потоке. Для расчета параметров и характеристик газозвудушных потоков каналов вентиляционных систем можно использовать известные теоретические подходы [1].

В тех случаях, когда невозможна организация контроля на требуемом расстоянии от места выброса, повысить точность измерения можно установкой датчика в точке сечения канала, где действительная концентрация соответствует среднему значению. С этой целью необходимо решить задачу о диффузии плоского кругового источника радиуса r_k в турбулентном потоке в круглой цилиндрической трубе радиуса r_0 , которая является типичной для вентиляционных систем энергоблоков атомных станций, химических производств и т.п.

Цель статьи

Целью работы является разработка рекомендаций для измерения концентрации примеси в газозвудушных потоках каналов вентиляционных систем.

Материалы и результаты исследования

В цилиндрической системе координат (r - радиус, x - осевая координата) уравнение турбулентной диффузии [3, 4] в осесимметричном потоке представляется следующим образом

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u_x \frac{\partial C}{\partial x} + u_r \frac{\partial C}{\partial r} = f(x, r, t) + D_e \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial C}{\partial r} + \frac{\partial^2 C}{\partial r^2} \right),$$

где C – концентрация, t – время, u_x, u_r – осевая и радиальная составляющие скорости; D_ϵ – коэффициент турбулентной (вихревой) диффузии; $f(x, r, t)$ – функция объемной плотности мощности источников примеси.

Примем допущение, что скорость потока постоянная по направлению и величине, равной средней скорости потока u_0 ,

$$u_x = u_0; u_r = 0.$$

Тогда имеем следующее уравнение диффузии

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u_0 \frac{\partial C}{\partial x} = f(x, r, t) + D_\epsilon \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial C}{\partial r} + \frac{\partial^2 C}{\partial r^2} \right). \quad (1)$$

Граничное условие к данному уравнению вытекает из требования отсутствия проникновения примеси сквозь стенки трубы и сводится к равенству нулю нормальной производной на границе

$$\left. \frac{\partial C}{\partial r} \right|_{r=r_0} = 0.$$

Начальное условие требует равенства нулю концентрации в трубе до включения источника

$$C|_{t=0} = 0.$$

Функцию плотности для импульсного плоского кругового источника, расположенного в начале координат, зададим следующим образом

$$f(x, r, t) = \delta(x)H(r_k - r),$$

где $\delta(x)$ – функция Дирака; $H(r_k - r)$ – функция Хевисайда [5].

Сделаем в уравнении (1) замену переменных

$$z = x - u_0 t,$$

т.е. перейдем в систему координат, которая движется с потоком. При этом, функция $C(x, r, t)$ перейдет в функцию $w(z, r, t)$, а функция $f(x, r, t)$ в

$$F(z, r, t) = \delta(z + u_0 t)H(r_k - r).$$

Производные преобразуются согласно выражениям

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} &= \frac{\partial w}{\partial z} \frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial w}{\partial t} = -u_0 \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial t}; \\ \frac{\partial C}{\partial x} &= \frac{\partial w}{\partial z} \frac{\partial z}{\partial x} = \frac{\partial w}{\partial z}; \\ \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial C}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right) = \\ &= \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \frac{\partial z}{\partial x} = \frac{\partial^2 w}{\partial z^2}. \end{aligned}$$

Подставляем данные соотношения в уравнение (1) и после преобразований получаем

$$\frac{\partial w}{\partial t} = D_\epsilon \left(\frac{\partial^2 w}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{\partial^2 w}{\partial r^2} \right) + \delta(z + u_0 t)H(r_k - r). \quad (2)$$

Таким образом, имеем обычное неоднородное уравнение диффузии.

Аналитическое решение уравнения (2) получено известными приемами математической физики [6] и имеет вид

$$\begin{aligned} w(z, r, t) &= \frac{r_k}{\sqrt{\pi r_0}} \int_0^t \frac{\exp \left[-\frac{(z + u_0 \tau)^2}{4D_\epsilon(t - \tau)} \right]}{\sqrt{D_\epsilon(t - \tau)}} \times \\ &\times \sum_{n=1}^{\infty} \exp \left(-\left(\frac{\mu_n}{r_0} \right)^2 D_\epsilon(t - \tau) \right) \times \\ &\times \frac{J_1 \left(\frac{\mu_n}{r_0} r_k \right) J_0 \left(\frac{\mu_n}{r_0} r \right)}{\mu_n J_0^2(\mu_n)} d\tau. \end{aligned}$$

где J_0 и J_1 – функции Бесселя первого рода нулевого и первого порядка; μ_n – корни уравнения $J'_0(x) = 0$.

С помощью замены $z = x - u_0 t$ переходим к неподвижной системе координат

$$C(x, r, t) = \frac{r_k}{\sqrt{\pi r_0}} \int_0^t \frac{\exp \left[-\frac{(x - u_0(t - \tau))^2}{4D_\epsilon(t - \tau)} \right]}{\sqrt{D_\epsilon(t - \tau)}} \times$$

$$\times \sum_{n=1}^{\infty} \exp\left(-\left(\frac{\mu_n}{r_0}\right)^2 D_e(t-\tau)\right) \times \frac{J_1\left(\frac{\mu_n}{r_0} r_k\right) J_0\left(\frac{\mu_n}{r_0} r\right)}{\mu_n J_0^2(\mu_n)} d\tau.$$

Эта функция и дает решение задачи о диффузии в потоке плоского кругового источника радиуса с r_k центром в начале координат.

В безразмерном виде полученное решение представляется следующим образом

$$\bar{C}(\bar{x}, \bar{r}, \bar{t}) = \frac{\bar{r}_k}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\bar{t}} \frac{\exp\left[-\frac{Pe_\theta(\bar{x} - (\bar{t} - \tau))^2}{16(\bar{t} - \tau)}\right]}{\sqrt{4(\bar{t} - \tau) Pe_\theta}} \times \sum_{n=1}^{\infty} \exp\left(-\mu_n^2 \frac{4(\bar{t} - \tau)}{Pe_\theta}\right) \frac{J_1(\mu_n \bar{r}_k) J_0(\mu_n \bar{r})}{\mu_n J_0^2(\mu_n)} d\tau.$$

где $\bar{C} = C/C_0$ - безразмерная концентрация (C_0 - средняя концентрация);

$\bar{X} = x/d, \bar{r} = r/r_0 = 2r/d$ - безразмерные координаты (d - диаметр трубы);

$\bar{r}_k = r_k/r_0 = 2r_k/d$ - безразмерный радиус источника; $\bar{t} = tu_0/d$ - безразмерное время;

$Pe_\theta = Re Sc$ - диффузионное число Пекле ($Re = u_0 d/\nu$ - число Рейнольдса; ν - кинематическая вязкость; $Sc = \nu/D_e$ - число Шмидта).

На рис. 1 представлена зависимость безразмерной концентрации примеси на оси трубы от расстояния до плоского кругового источника для различных его размеров при $Pe_\theta=368$ и в момент времени $\bar{t} = 0,1Pe_\theta = 3.68$. Как видно из рисунка, с увеличением расстояния от источника все кривые выходят на один уровень

На рис.2 показано распределение концентрации примеси по радиусу трубы на расстоянии $10d$ от плоского кругового источника для различных его размеров. Как и следовало ожидать, при увеличении размера источника распределение становится более равномерным. Интересно отметить, что все кривые пересекаются в одной точке, лежащей на расстоянии 0.62 радиуса трубы от ее оси. Это значит, что если датчик концентрации поместить в этой точке, он покажет значение средней концентрации в потоке.

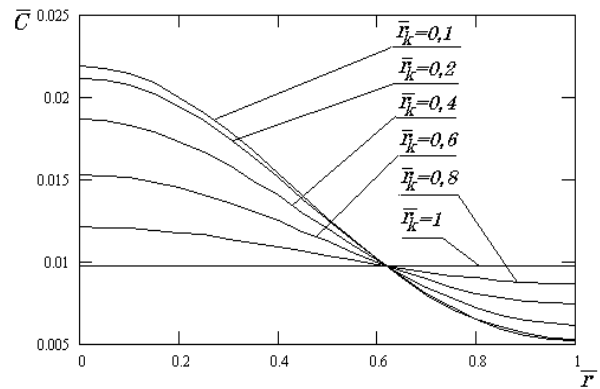


Рис. 1. Зависимость концентрации на оси трубы от расстояния до источника

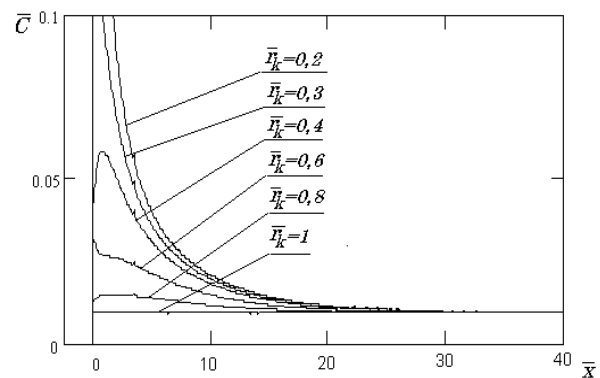


Рис.2. Распределение концентрации по радиусу на расстоянии $10d$ от источника

Наиболее точную информацию о степени равномерности распределения дает величина отношения концентрации у стенок трубы к концентрации на оси. Ее величина изменяется от нуля при полностью неоднородном распределении, до единицы при полностью равномерном. Зависимость этой величины от расстояния до источника при различных размерах источника приведена на рис. 3. Так, при расстояниях более $30d$, степень равномерности не менее 0.95 для всех размеров источника.

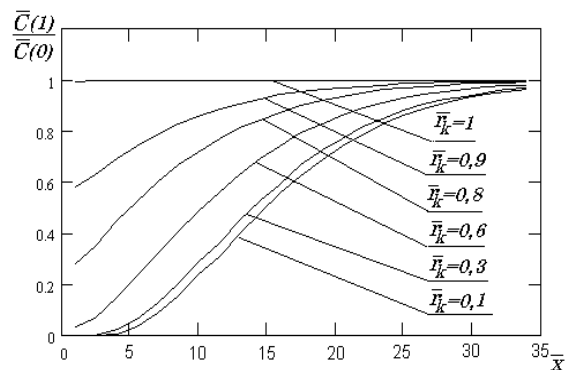


Рис.3. Зависимость отношения концентрации у стенок к концентрации на оси от расстояния до источника

Выводы

Таким образом, для измерения концентрации примеси в потоке датчик следует устанавливать на расстоянии 30 диаметров канала и более от источника примеси, что обеспечивает погрешность измерения средней концентрации менее 5%. В том случае, когда нельзя реализовать данные рекомендации, для повышения точности следует организовать измерение на расстоянии 0.62 радиуса трубы от ее оси, где действительная концентрация примеси в газоздушном потоке соответствует среднему значению.

Литература

1. Недопекин Ф.В. Диффузионные процессы в стационарных газовых потоках / Ф.В. Недопекин, А.А. Коваленко, В.И. Соколов, Г.С. Калюжный, Н.Д. Андрийчук. – Луганск: ВНУ им. В. Даля, 2007. – 224 с.
2. Retherford Aris. Introduction to the Analysis of Chemical Reactors. Departments of Chemical Engineering University of Minnesota. Prentice - Hall. Inc., New Jersey, 1967. - 340 p.
3. Соколов В.И. Инженерные задачи диффузии примеси в потоке / В.И. Соколов, А.А. Коваленко, Г.С. Калюжный, С.А. Минин. – Луганск: ВУГУ, 2000 – 168 с.
4. Коваленко А.А. Основы технической механики жидкостей и газов: учебное пособие для вузов / А.А. Коваленко, В.И. Соколов, А.Х. Дымнич, П.Е. Уваров. - Луганск: ВУГУ, 1998. - 272 с.
5. Иванов В.А., Медведев В.С., Чемоданов Б.К., Ющенко А.С. Математические основы теории автоматического регулирования / Под ред. Б.К. Чемоданова. – М.: Высшая школа, 1971. – 808 с.
6. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. – М.: Наука, 1979. – 736 С.

References

1. Nedopekin F.V. Diffuzionnye processy v stacionarnykh gazovykh potokakh / F.V. Nedopekin, A.A. Kovalenko, V.I. Sokolov, G.S. Kaljuzhnyj, N.D. Andrijchuk. – Lugansk: VNU im. V. Dalja, 2007. – 224 s.
2. Retherford Aris. Introduction to the Analysis of Chemical Reactors. Departments of Chemical Engineering University of Minnesota. Prentice - Hall. Inc., New Jersey, 1967. - 340 p.
3. Sokolov V.I. Inzhenernye zadachi diffuzii primesi v potoke / V.I. Sokolov, A.A. Kovalenko, G.S. Kaljuzhnyj, S.A. Minin. – Lugansk: VUGU, 2000 – 168 s.
4. Kovalenko A.A. Osnovy tehniczeskoj mehaniki zhidkostej i gazov: uchebnoe posobie dlja vuzov / A.A. Kovalenko,

V.I. Sokolov, A.H. Dymnich, P.E. Uvarov. - Lugansk: VUGU, 1998. - 272 s.

5. Ivanov V.A., Medvedev V.S., Chemodanov B.K., Jushhenko A.S. Matematicheskie osnovy teorii avtomaticheskogo regulirovanija / Pod red. B.K. Chemodanova. – М.: Vysshaja shkola, 1971. – 808 s.
6. Tihonov A.N., Samarskij A.A. Uravnenija matematicheskoi fiziki. – М.: Nauka, 1979. – 736 S.

Соколов В.І. Вимірювання концентрації домішок в каналах вентиляційних систем.

Розглядається питання вимірювання концентрації домішки в газоповітряних потоках. Для визначення місцеположення датчика, відповідного середньої концентрації домішки, вирішується задача про дифузію в потоці плоского кругового джерела. На основі аналізу аналітичного рішення показано, що рівномірна концентрація встановлюється на відстані 30 і більш діаметрів каналу від місця викиду домішки. У разі, коли не можна реалізувати дані вимоги, рекомендується розміщувати датчик концентрації на відстані 0.62 радіуса труби від її осі.

Ключові слова: промислові викиди, домішка, концентрація, дифузія.

Sokolov V.I. Measurement of admixture concentration in channels of ventilation systems.

The problem of concentration measurement of admixture in gas-aero streams is considered. For determination of a site of the gauge appropriate to average concentration of admixture, the problem about a diffusion in a stream of a flat circular source is decided. Because of analysis of an analytical solution is shown, that uniform the concentration is installed on a distance 30 and more diameters of the channel from a place of an ejection of admixture. In case, when it is impossible to realize this request, it is recommended to place the gauge of concentration on a distance 0.62 radiuses of a pipe from its axes.

Key words: industrial ejections, admixture, concentration, diffusion.

Соколов В.І. – декан факультету машинознавства та електромеханіки, завідувач кафедри машинобудування, верстатів та інструментів Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля.

Рецензент: **Осенін Ю.І.**, д.т.н., проф.

Стаття подана 05.10.2015.